

# 光ファイバー土木計測技術と欧州（イギリス） におけるその動向

堀地 紀行\*・奥 要治\*\*

## Technical report on optic fibre measurement technology applied to civil engineering in Europe especially United Kingdom

Noriyuki HORICHI\*, Yoji OKU\*\*

**Abstract:** Optical fibre measurement technology applied to the measurement for civil engineering structures comes in two major types. The FBG (Fiber Bragg Grating) method is suitable for the measurement of strains on the order of  $10^{-6}$  m and has been adopted mainly to identify the internal stresses of structures. The B-OTDR (Brillouin-Optical Time Domain Reflectometry) method is applicable to the measurement of strains on the order of  $10^{-4}$  m and has been employed for measuring displacements of structures and soils.

This paper presents the results of researches that the author conducted on the FBG method in the City University of London and on the B-OTDR method in University of Cambridge as a visiting professor during the six-month period since April 2006. In the introductory section, the principles and applications of representative optical fibre measurement technologies are described. In the main text, the researches being conducted in the two universities that the author visited, the research activities that the author performed and future prospects are provided.

### 1. はじめに

IT 社会を担うインフラ設備である大容量伝送路の光ファイバーケーブルは、日々の生活のなかで我々に多大な恩恵を与えるとともに、テレビ CM などその話題に一日たりとも触れない日はないほど、瞬く間に私たちの生活に融け込んだが、この光ファイバーケーブルの周辺技術の一つとして、ケーブル自体をセンサーとした計測技術が開発されていることは、一般の方のもとより、技術者においても、さほど多くの方々には浸透していないように思われる。

橋梁、トンネル、管路、地盤などの公共構造物の設計・施工を取り扱う我々土木技術者にとって、施工中の精度、強度の確認や施工後の管理などを目的とした構造物の計測管理は、設計・施工とともに大変重要な事項として受け止められてきた。しかし、ここ数年来の動きではあるが、土木計測技術として構造物の変位やひずみの測定において、光ファイバーケーブル自体をセンサーとして用いた技術が開発され、国内を初め国外においても良好な実績を収めていることはあまり知られていないようである。本稿では、光ファイバー計測技術の概要と、

今後の展開等について述べるとともに、昨年、筆者の一人がロンドン市立大学とケンブリッジ大学に在外客員研究員として赴任し、土木工学分野における光ファイバー計測技術（Optical fibre measurements）について行った研究活動の一部を報告する。

### 2. 光ファイバーセンサー

光ファイバーセンサーは、光ファイバーケーブル自体をセンサーとしたもので、材質としては石英ガラスをベースとしたグラスファイバーであるため、腐食に強く、可撓性に富み、電磁気的な影響も受けないといった特徴を有し、過酷な条件の土木構造物の計測にとっては打って付けのセンサーといえる。代表的な計測方式とその原理を簡単に紹介すると、以下のようになる。

- (1) FBG 法（ $\mu$ ；マイクロ、 $10^{-6}$  オーダーのひずみ測定が可能な光ひずみゲージ）

光ファイバーケーブルのコアの一部区間に、屈折率の高い格子を縦断的に等間隔で配列したケーブルを用い、レーザー光を入射すると、格子と通常コア部との屈折率の違いの関係で、特定の波長（Bragg 波長）の光が反射する。一方、ケーブルにひずみが発生すると、当然ながら格子の設置間隔に変化が生じ、これに伴い反射光の Bragg 波長もひずみに比例して、その波長をシフトさせ

\* 国士舘大学理工学部 教授

\*\* 日本コムシス㈱ 常務執行役員

る。この特性を利用した方法が、FBG (Fibre Bragg Grating) と呼ばれる方法である。極めて細い光ファイバーケーブルの中心部コアに一定間隔で屈折率の高い格子を配置するという、特殊なケーブル加工技術を伴い、その加工には、コア部への薬剤添加と透過レーザー光の干渉などの高度技術が使われている。

(2) BOTDR 法 (光ケーブル 1 m 当たり 0.1 mm の変位測定が可能なゲージ)

光ファイバーケーブルに単色性の高いレーザー光を露光すると、入射光がすべて透過するわけでは無く、一部の光が後方に反射する。これを後方散乱光と呼び、波長域によって、それぞれレイリー (Rayleigh), ブリルアン (Brillouin), ラマン (Raman) と呼ばれる発見者の名前に因んだ散乱光が存在する。このうち、ブリルアン散乱光は、光ファイバーケーブルにひずみが発生すると、そのひずみの大きさに比例し、散乱光の波長がシフトするという特性を有している。一方、反射光のサンプリングを行い、入射光との時間差を測定し、位置を解析する技術として、光ファイバーケーブルの保守管理に使われている OTDR 法 (Optical time domain reflectometry: 光学的時差反射法) と呼ばれる技術がある。光ケーブルのひずみを読み取る技術と、特定のひずみの発生位置を測定する技術を融合した技術が BOTDR 法である。これを用いると、たとえば構造物に 1 m 間隔で固定ジグを設置し、このジグに光ファイバーケーブルを緊張力を導入して敷設する。そして構造物に荷重が作用すると、固定ジグ間が伸び縮みし、それに呼応して光ファイバーケーブルも伸び縮みするので、測定器の分解能として 1 m あたり 0.1 mm の変位、ひずみ換算で  $100 \mu$  の測定が可能である。一般的なもので、現在のところゲージ長は 1 m が要求される。

(2-1) レイリー (Rayleigh) 散乱光や、ケーブルの接続点で発生するフレネル反射光に着目し、あわせて入射光、反射光の時間差から位置も特定し、ケーブル保守管理に用いる方法が、先にも若干紹介したが、OTDR 法と呼ばれる計測技術である。

(2-2) ラマン (Raman) 散乱光は、温度変化によって反射光の波長をシフトさせる。これを利用することによって、温度測定が可能である。

(3) OSMOS (Optical strand monitoring system)

センサー部分に 3 本より線を用い、入射光として赤外線を使用し、センサー部分を往復して戻ってきた赤外線の減衰をひずみに換算する技術である。

### 3. ロンドン市立大学における光ファイバー計測技術の研究

ロンドン市立大学は、1894年創立の公立大学で、6学部を擁し、学長はロンドン市長が兼ねる。金融、法律、医療工学、介護系、情報系、数理工学系の各学部、大学

院とビジネススクール系大学院で教育・研究に高い評価を受けている総合大学で、およそ13,000人の学生が学び、短期コースの学生や派遣研究員、教職員を含めると23,700人の規模を有し、日本からも100人ほどの学生が勉学に励んでいる。所在地は、シティーと呼ばれる旧市街から北へ1 km ほどの閑静な地区にあり、南に下ればロンドン塔やセントポール大聖堂、西に向かえば大英博物館など、観光名所も半径1~2 km ほどで、優れたロケーションを併せ持った大学である。(写真-1 参照)

ロンドン市立大学では、主に FBG センサーを用いた計測技術の研究が行われている。土木工学分野において、現在対象としている構造物は、鋼橋、コンクリート橋梁、杭、そして最近開発された合成樹脂橋梁などである。

序論でも少し触れたが、FBG センサーの測定原理について、ここで、説明を加えておく。

FBG センサーは、コア、クラッド共に石英ガラスを材料とした光ファイバーケーブルの母材において、感光性を高めるためゲルマニウムをコアの中に微量添加し、あらかじめ縦断方向に干渉縞を持たせた紫外線レーザー光を露光してコア内に縦断的に屈折率の異なる格子を一定間隔で生成、配列したもので、これには石英ガラスが波長250 nm (ナノ) m 近傍の紫外光に対して化学構造の変化をきたし、屈折率が変化、上昇する性質を利用している。こうして作製された FBG センサーに、紫外線レーザー光を露光すると、屈折率の異なる格子の存在から回折現象が起こり、その格子の配置間隔 (周期) と



写真-1 ロンドン市立大学のビクトリア朝の玄関

の関係から式(a)で定義されたブラッグ波長の光が反射される。

$$\lambda_B = 2\eta_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (\text{a})$$

ここで、 $\lambda_B$  は Bragg 反射される波長 (Bragg 波長)、 $\Lambda$  は屈折率格子の配置間隔 (周期)、また、 $\eta_{\text{eff}}$  は伝播モードの実効屈折率。

式(a)の屈折率格子の配置間隔 (周期) が、外力の影響で伸縮、つまりひずみが生じると、その周期変化に応じたブラッグ波長のシフトが生じ、その値から FBG に作用するひずみを求めることができる (図-1 参照)。

またブラッグ波長の変化には FBG ケーブル自体に生じたひずみによる光弾性効果による波長の変化も含まれ、その値は、汎用的な長距離光伝送路に用いられているレーザー光の波長1550 nm 付近で、1  $\mu$  ストレイン当たり1.2 pm であり、1 p (ピコ、 $10^{-12}$ ) m の波長変化の検出能力で、ひずみ1  $\mu$  が計測可能となる。

ロンドン市立大学の研究では、単に FBG センサーを電気抵抗ひずみゲージの代替としてのみならず、ライフサイクルコストを考慮した長期的な構造物管理手法の確立を視野に入れた取り組みを検討している。独創的な例としては、コンクリート構造物の劣化の指標として、コンクリートの経年変化によるポーラス化やクラックの発生・伸展に伴う水分の浸潤に起因するコンクリート内部の湿度変化に着目し、独自に湿度測定用の FBG センサーを電子系教員と共同開発し、センサーをコンクリート内部に埋め込み、測定実験を行い良好な結果を得ている (写真-2 参照)。湿度測定用 FBG センサーの製造方法は、感度を上げるためにホウ素とゲルマニウムが微量添加されたケーブルコア母材を用い、紫外線レーザー

光で格子生成後、ポリイミド樹脂で、ケーブルを被覆する。通常の FBG センサーも保護を目的に被服厚が5  $\mu\text{m}$  のポリイミド樹脂で被覆されている。しかしポリイミド樹脂は水分を吸収して膨張する特性を有しており、この関係に着目してポリイミド樹脂の伸びと相対湿度の関係、被服厚の影響などを分析し、その結果、相対湿度23%から97%の範囲において良好な線形性を示すことを確認している。この特性を用いて実用的な湿度測定用 FBG センサーが開発されている。相対湿度とブラッグ波長の関係は、ケーブルのひずみの媒介により、一般的な長距離通信の波長域1550 nm 近傍で、図-2 のように示される。さらに、ポリイミドの被覆厚さによる関係は図-3 に示される。またこの他に、ケーブルの温度変化に対してブラッグ波長の変化は、基本特性として認識さ

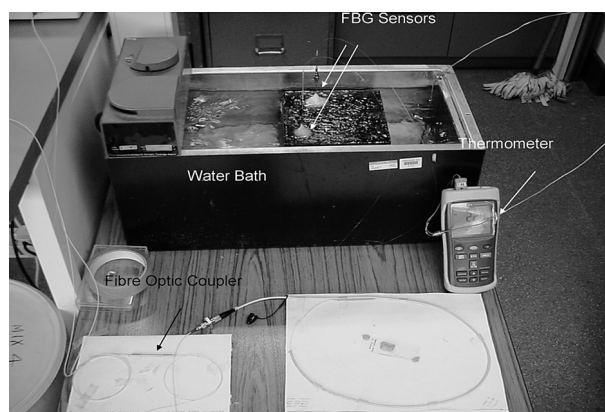


写真-2 FBG センサーの湿度測定実験の状況 (提供: ロンドン・シティ大学)

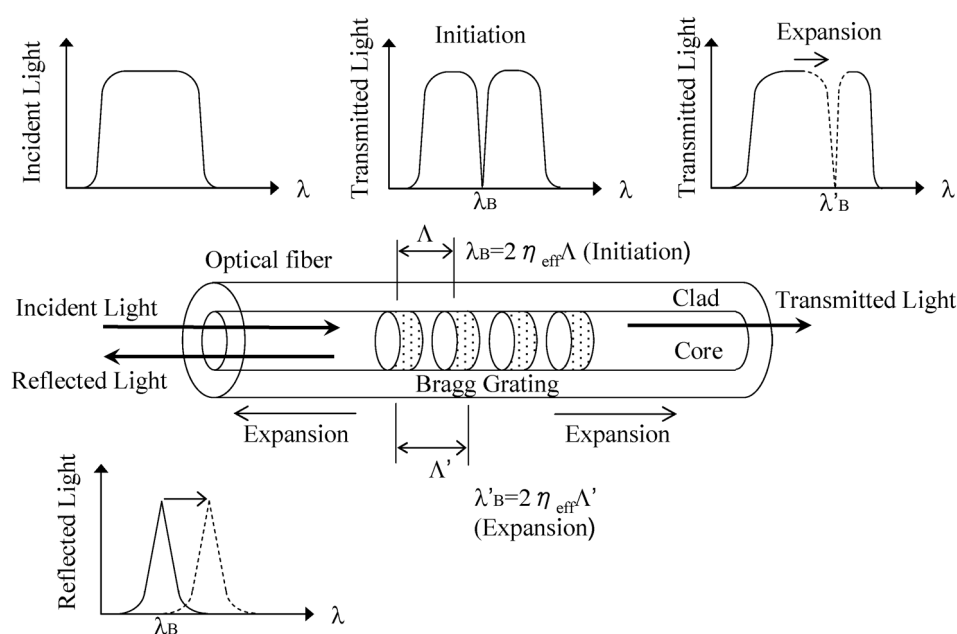


図-1 FBG センサーの測定原理

れているが、400℃の高温領域に対する温度測定用のFBGセンサーを開発し、構造物の火災による劣化判定や、機械工学系分野のテーマであるエンジンの排気温度の測定などにも応用の道を広げている。

#### 4. ケンブリッジ大学における光ファイバー計測技術の研究

ケンブリッジ大学はここで紹介するまでも無く、世界屈指の研究・教育実績を有する大学で、かのニュートンやノーベル賞受賞者を現時点で81名輩出したことでも有名である。ケンブリッジ大学における土木工学分野での光ファイバー計測技術に関する研究は、工学部とその付属機関であるスコフィールドセンターの地盤工学分野で実施されている。そこでは、トンネル、斜面監視、杭の変位などの地盤系の他に、コンクリート構造の梁などの計測にも展開を図っている。

計測技術としては、対象構造物がトンネルや土構造が主体であることから、計測値としてmmオーダーの変位レベルの値を求める事例が多いため、光ファイバー計

測技術としては、BOTDRを主体とした研究が進められている。BOTDRの計測原理は、光ファイバーケーブルに露光されたレーザー光の反射光が、光ケーブルに生じたひずみに比例してその反射光の波長をシフトさせるという特性を利用し、その値を計測することによって、固定された光ケーブルの区間内における変位を測定するので、概念図を（図-4）に示す。

また計測事例として、BOTDRを用いたトンネル断面の変位計測事例を以下に紹介する。

現在、ロンドン市内で100年ほど経過したレンガ造りのテムズリンク鉄道複線断面トンネルの極めて近接した下部の地下空間に、現行ウォーターlooer駅からセントパンクラス駅にターミナルを移設するに伴い、ドーバーを渡ってパリ、ブリュッセルと連絡しているユーロスター

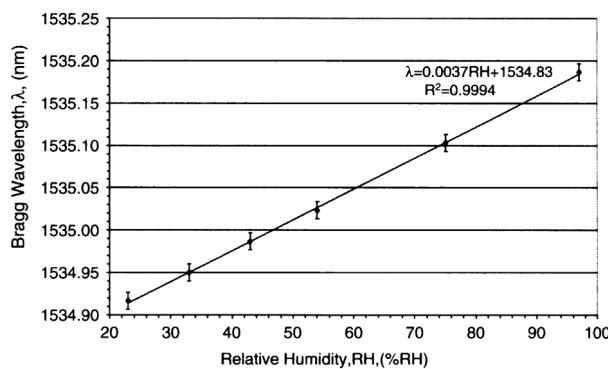


図-2 FBG湿度センサーの線形特性グラフ（提供：ロンドン・シティ大学）

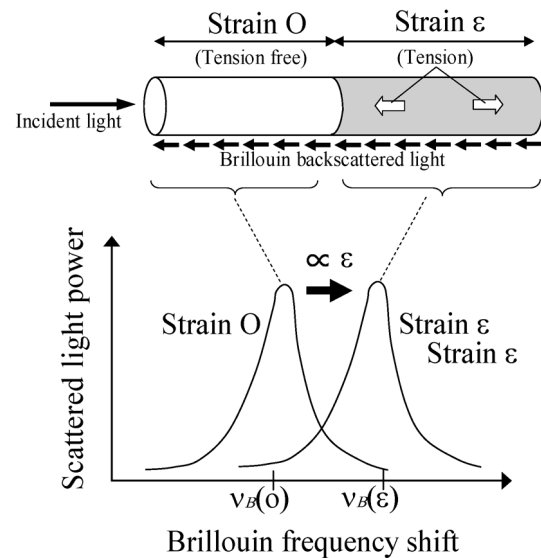
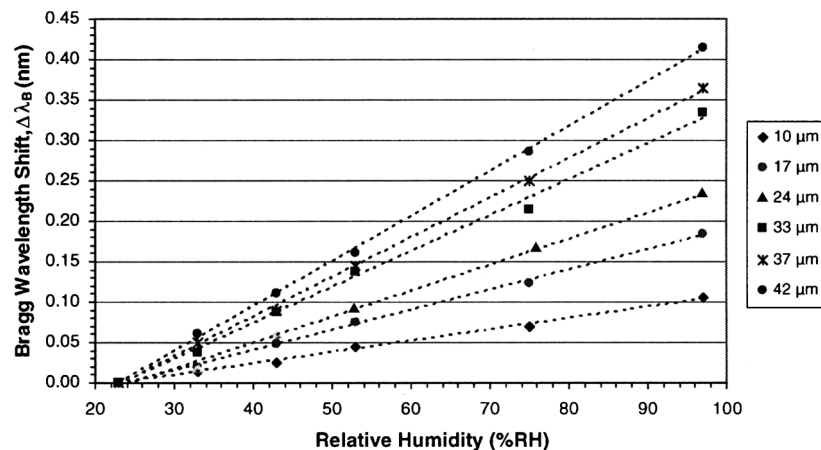


図-4 BOTDRの測定原理の概念図



2. RH response of the sensors with different coating thicknesses from 23 to 97%RH at constant room temperature.

図-3 FBG湿度センサーの相対湿度と波長シフトの特性（皮膜厚をパラメータとして）（提供：ロンドン・シティ大学）

のロンドン市内の地下新線が建設されている。図-5は、レンガ造りのトンネル内空に光ファイバーケーブルを内接多角形のように折れ線状に配置した様子である。図-6は、既設トンネルの下部に、新トンネルが建設された際、既設トンネル下部の地山が緩められ、その影響による既設トンネルの変位挙動を示す概念図の一つで、トンネルの天端で負の曲げモーメントによるものと同じ変形モードが発生している。これは、石積みに近いレンガ構造であるため、曲げモーメントの他にトンネル内空側へのせん断に起因したずれによる天端ドーム部の弦の縮小の主に2つの要素が考えられる。またトンネルの側壁部分では正の曲げモーメントもしくは、底盤の沈下などによる側壁の弦が伸びる変形モードが発生し、それらの変位に対して、配置した光ファイバーケーブルの伸びと縮みで、変位を良好に測定している。レンガ造りのトンネルの場合、レンガ間のモルタルの剥離やレンガ相互のずれなども考えられ、材料の連続性や微小変形の仮

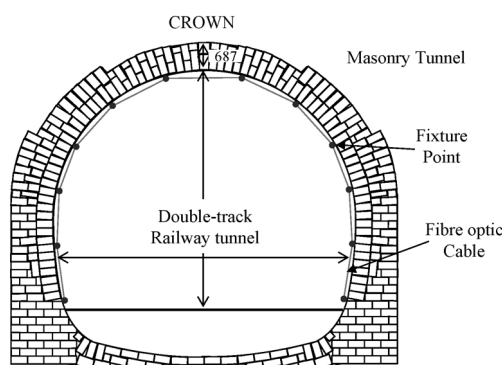


図-5 レンガ造りの鉄道トンネルと計測状況

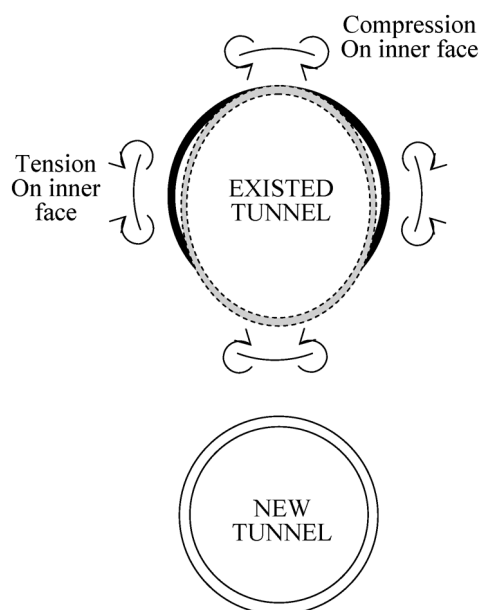


図-6 下部新設トンネル建設時の既設トンネルへの影響

定の設定が困難なため、曲げモーメントによる変形か、軸力変化か、ヒンジの形成にともなう回転やずれ変形かの判定は難しく、断面力を把握することは困難であるが。内空変位を指標として、近接施工における安全管理の重要なファクターの役割を果たしていることには相違ない。

次の計測事例として、BOTDR を用いた斜面の変位計測事例を紹介する。高速道路沿いの斜面において、近接施工に伴う斜面の変位挙動や、降雨時の斜面監視を目的とした研究を行っている。ケーブルを補強し、地山の動きとの一体化の目的で、ジオグリッドを設置基材として利用している。光ファイバーケーブルをジオグリッド表面に接着剤で添接し、斜面に種々のパターンを設定して、地中に敷設し、のり尻を開削して斜面に強制的に変位を与え、設置パターンの違いによる値の出方の変化などについて分析を行っている。この高速道路の斜面の現場計測には筆者の一人も同行し測定に加わった。その時の状況を(写真-3)と(図-7)に示す。斜面測定で、ジオグリッドと土は必ずしも一体として挙動はしないため、地山の変位の絶対値を把握することは難しい。

#### 4. ま と め

FBG センサーをはじめとして、一般に光ファイバー計測システムは、その材質的な優位性のみならず、光通信網の整備により、電気式センサーと比較して、膨大な測点数の計測にも対応でき、しかもデータサンプリングも遠隔で統括集中できるところに最大の優位性が見られる。たとえば、複数のトンネルや橋梁の計測値を現場ごとではなく、一箇所で集約してデータサンプリングができ、統一的な比較と管理が可能で、管理コストの節減も望める。土木技術としての方向は、構造物のメンテナンスを例とすれば、耐久性に及ぼす支配要因を分析し、適切な指標を選択して、それに対応した FBG センサーを内蔵した独自センサーを開発し、工学的に妥当なポイントにセンサーを設置することが求められる。

BOTDR による計測事例として、トンネルと斜面を紹介した。トンネルの計測例は、覆工がレンガ構造のため計測された変位から断面力の変化を算定することは難し



写真-3 BOTDR を用いた斜面計測状況

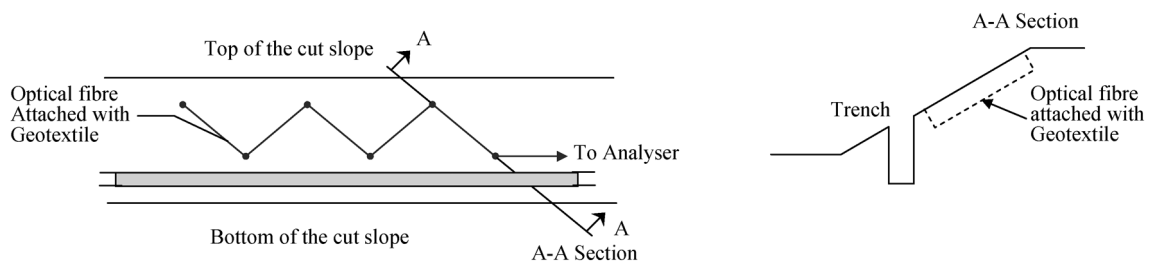


図-7 BOTDR の斜面の変位計測への適用例

いが、仮にシールドトンネルのように、断面が鋼製やコンクリート製の円形セグメントリングなどの場合は、シールドトンネルの骨組み構造として扱えるため、断面力の把握も容易となり、光ファイバーケーブルを内接多角形的な折れ線で配置することは実トンネルの内空の確保の面からも効果的なケーブル敷設方法と考えられる。また、斜面計測で、地山挙動を絶対値として把握することは、ケーブルと地山の動きの一体性を保つという点では、かなり難しく、むしろ斜面崩壊の予兆の小さな動きを示す箇所へ設置し、危険予知のシグナルの役割として用いる方法も考えられ、今後の研究・開発テーマと考えられる。

今後の光ファイバー計測技術の展開としては、既往の事例に加え、過酷な条件に曝<sup>さら</sup>されるたとえば海底トンネルなどの土木構造物の保守や、劣化が深刻な歴史的建造物の維持、補修に活かすことなどが期待される。

補遺：「英・日 光ファイバー構造物モニタリング技術と欧州建設事情」と題して2007年5月11日（金）に、NTT アクセスサービス研究所の主催により、土木構造物の光ファイバーを活用した計測技術等に関するセミナーを開催し、技術情報の交換と、技術の国際交流を図った。イギリスからは、ロンドン市立大学のボズエル教授、ルンド大学（スウェーデン）のアトキン教授（ロンドン市立大学の客員教授）、ケンブリッジ大学の曾我健一助教授（当日は国際電話で講演）をお招きし、日本からはNTT インフラネットの藤橋一彦部長、NTT アクセスサービス研究所の上原秀幹主幹研究員、筆者の一人である国土館大学の堀地紀行が、それぞれ光ファイバーの計測技術とその活用そして欧州のプロジェクトの動向について講演を行った。セミナー参加者は130名を超



写真-4 セミナーにおけるボズエル先生の講演



写真-5 セミナー発表者と関係者

え、意見交換等を踏まえ大変有意義なものとなった。（写真-4）（写真-5）参照。